

安信  
1993 9/21

安信誠二，村井泰仁，椎名寿英 予見ファジィ制御の駐車制御への応用，電気学会研究会資料，産業計測制御研究会IIC-93-46, pp.69-78, 1993年9月

# 電気学会研究会資料

産業計測制御研究会

IIC-93-39~46

1993年9月21日

社団法人 電気学会

東京都千代田区有楽町1-12-1

## 予見ファジィ制御の駐車制御への応用

安信 誠二    村井 泰仁\*    椎名 寿英  
(筑波大学)

### 1. はじめに

最近、ファジィ理論を様々な制御に応用しようという試みが盛んに行われている。このファジィ制御は、仙台市地下鉄の自動運転[1]や各家庭用電気製品などの実システムへ適用されている[2]。また、2次元平面上の移動体の制御への応用に関しても、知能ロボットである自立型移動ロボットの縦列駐車[3]や、ファジィ推論を用いた移動ロボットの障害物回避[4]などの研究が進められている。本研究では、列車自動運転などで実用性を確認している予見ファジィ制御を用いて四輪自動車の駐車制御における熟練者の運転を組み入れたファジィ制御方式を提案する。

ここで制御対象とした四輪自動車は、我々が最も頻繁に使用する普通乗用車である。近年、自動車の利用台数は急増し、都心部の駐車場の数も自動車の台数に追いつけず、自動車一台当たりの駐車スペースも狭くなってきているのが現状である。つまり、初心者にとって車を駐車させることは非常に困難となってきた。そこで、熟練者の経験知識・運転操作をアルゴリズム化することによって、コンピュータにより駐車操作の支援をはかり、初心者にでも容易に駐車させることが可能となるシステムが重要となってくる。本研究の目的は、熟練者の四輪自動車の駐車制御に関する制御知識を組み込める予見ファジィ制御方式を基礎とするファジィ制御系を提案し、シミュレーションによりその有効性を確認することである。

### 2. 人間による自動車の駐車運転

人間は自動車を駐車させる時、周囲の状況や移動速度を大まかに認識して、上手く定位置に駐車させることができる。すなわち人間は過去に行った経験と知識に基づいて、real timeに危険を察知し実行することができる。その人間の運転知識を利用し、上手く目標位置に自動車を駐車させるまでのアルゴリズムを決定し、これをコンピュータに代行させることを考える。そこで、まず一般に四輪自動車はどのような動きをするのか、また人間はどのような制御戦略で車を操作するのかを考える。

#### 2.1 四輪自動車の操舵機構

四輪自動車の低速時の旋回運動において、前輪操舵の四輪自動車が遠心力の発生を無視できるような低速度で円旋回を行う場合、各車輪は横滑りせずに路面と点接触して転がっていると考えることができる。よって、車体が円旋回するには車輪それぞれの回転中心軸の延長上に旋回中心を持つことになる。内外

の後車輪軸は一木の車輪軸上にあるので、この延長線と前車輪軸のそれぞれの延長線が一点で交わることが条件となる。この交点Cが旋回中心である。(図1)

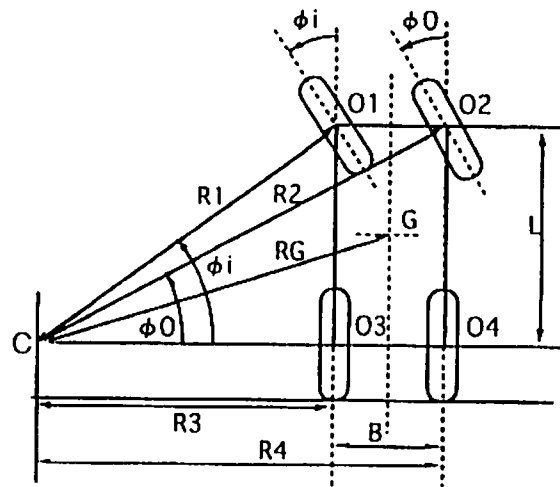


図1 四輪自動車の旋回における幾何学的関係

このような幾何学的な関係を満たすように車両を動かす方式として、アッカーマン・ジャントウの操舵機構[5]がある。

車両が上記の関係を保っている時、旋回時における運動方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= v \cos\phi \cos\theta \\ \frac{dy}{dt} &= v \cos\phi \sin\theta \\ \frac{d\theta}{dt} &= \frac{v}{L} \sin\phi \\ \frac{d\phi}{dt} &= \omega \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、現在位置を後二輪の中間の座標 $(x, y)$  (以下車体の位置と呼ぶ)、車体の傾き角を $\theta$ 、操舵角を $\phi$ 、前輪と後輪との距離を $L$ 、前輪の平均速度を $v$ 、前輪の回転角速度を $\omega$ とする。

したがって、操舵角 $\phi$ 、速度 $v$ を一定に保った場合、例えば現在位置を $(x_0, y_0)$ 、車体の傾き角を $\theta_0$ とした時、 $T$ 秒後の位置 $(x_T, y_T)$ 、車体の傾き角 $\theta_T$ は次のように計算できる。

$$\begin{aligned} x_T &= \frac{L}{\tan\phi} \cos(kT) + x_0 \\ y_T &= \frac{L}{\tan\phi} \sin(kT) + y_0 \\ \theta_T &= kT + \theta_0 \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 $k = \frac{v \cos\phi \tan\phi}{L}$

## 2.2 熟練者による自動車の手動操作過程

四輪自動車の駐車制御の操作過程を図2に示す。運転者は走行速度や現在位置等の周囲の状況を目、耳、体で確認し、その情報が脳に伝達される。脳はその車両性能と目標速度・目標位置を考慮しながら操作量を決定し、手や足にハンドル操作・アクセル操作を実行させる。それらの実行が自動車の出力となって、周囲の状況として再び運転手の情報になる。

また、熟練者があらゆる状況に対して下す判断は、次に示すような大まかな階層として考えることができる。まず、最終目標にたどり着くために、いくつかの途中目標を設定する。つまりある目標におよそ達したら、次の目標に進むという方法で順に途中目標を変えながら最終目標に向かう。次の目標位置と走行速度の設定は、現在の車体の位置と向きによって、「もし目標位置が左前方にあり車体が平行ならば、中間位置で車体を左に傾ける。」のような経験則で決定する。

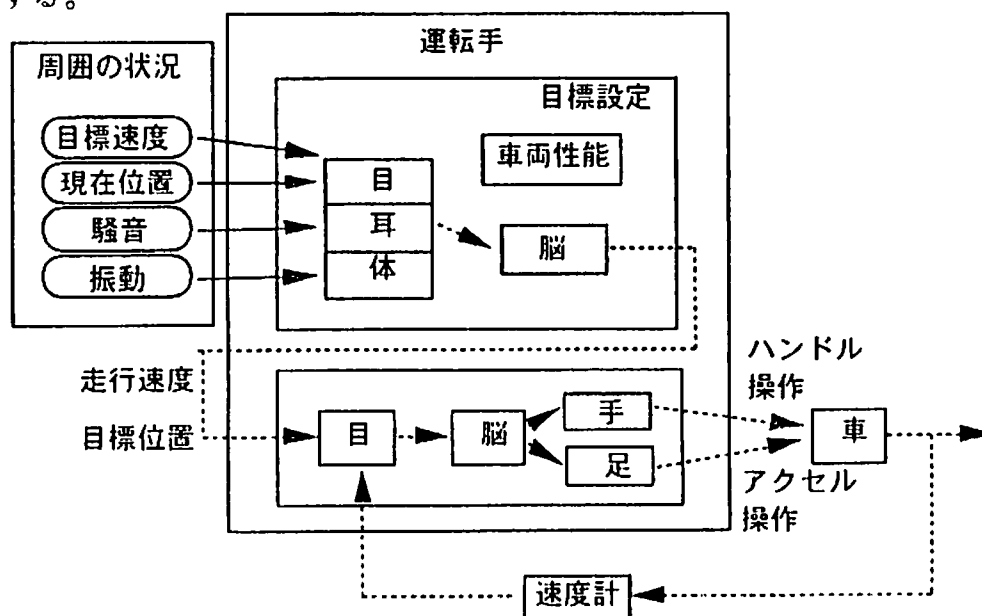


図2 自動車の手動運転による操作過程

そして目標位置と向きが決まれば、それに上手く到達するためにハンドルをどのように切るか、あるいは速度をどのぐらいにするかという具体的な実行操作を決定する。その経験則をルール形式で書くと次のようになる。

- ```

IF   ハンドルを保持すれば目標にうまく近づく(good)
      THEN   ハンドルを保持する
IF   まっすぐ直進すれば目標にうまく近づく(good)
      THEN   まっすぐ直進する
IF   ハンドルを右にきれば目標に正確に近づく(very good)
      THEN   ハンドルを右にきる
IF   ハンドルを左にきれば目標に正確に近づく(very good)
      THEN   ハンドルを左にきる
    
```

これらは、直進するか、右折あるいは左折するか、のハンドル操作を仮定しそれらの実行結果を予測して、一番適当な操作を実行するという経験則である。

ここで示したのは人間が考える経験則のごく一部分であり、実際はこれらの経験則を拡張して制御ルールとする。例えばハンドルを右にきる時、ちょっと右にきる、普通に右にきる、大きく右にきるなど、右にも度合いを考えることでルールは増えることになる。

熟練者はこのような経験則に従って自動車を運転していると考えられることができる。コンピュータでこれを実現するには、それらのルールをコンピュータに理解できるように定量化する必要がある。そこで、人間の言葉を定量化するファジィ理論を用いたファジィ制御を適用する。

### 3. 予見ファジィ制御による駐車制御

#### 3.1 ファジィ制御

人間の「少し」とか「若い」といった曖昧な言葉を定量的に取り扱う理論として、ファジィ理論がある。このファジィ理論は、1965年に米国カリフォルニア大のザデー (Zadeh) 教授が書いた論文 "Fuzzy Sets" に始まる。このファジィ理論に基づいて、1974年にロンドン大のラムダニ教授がスチームエンジンの実験装置へ適用したのが、ファジィ制御の始まりである。ファジィ制御は、if-then 形式のファジィ制御規則を用いて制御器を作ることや、曖昧さを含んだ言葉で制御方策を記述することなどが特徴としてあげられる。この人間の曖昧な行動にかなり順応し、その知的行動をモデル化できるという利点を生かして、ファジィ制御は特にマンマシンシステムの分野で広く応用されている。

#### 3.2 階層的ファジィ制御アルゴリズム[1]

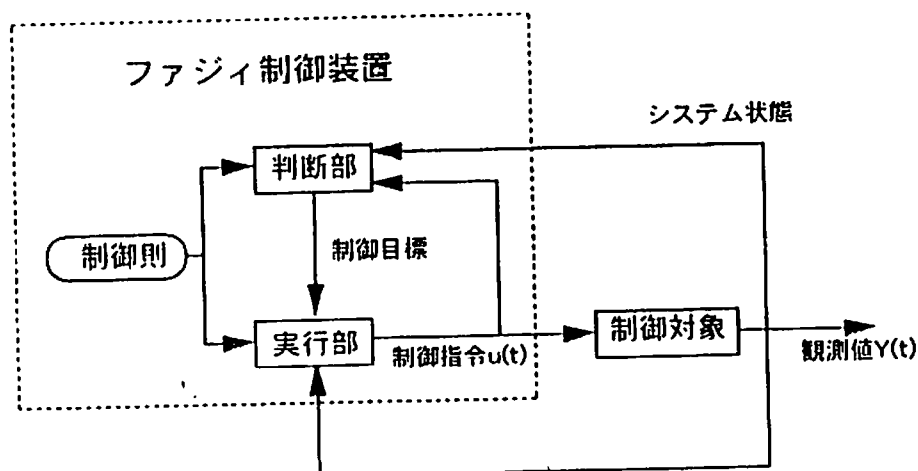


図3 階層的ファジィ制御の構成

人間の駐車制御に関する知的活動を一組の経験則で表現しアルゴリズム化することによって、実システムへ適用するために次のような二階層ファジィ制御

コントローラを考える。つまり、①判断部、②実行部の二階層に対し、状態評価、予見（目的評価）の二つのファジィ制御の考え方を適用する。

①判断部

現在の状態やシステム定数値から、過去の経験に基づき、現在実行可能な制御指令を予測・予見し、最適な制御目標を判断し決定する。

②実行部

決定した制御方策に基づき、制御指令を出力する。

3.3 評価指標のファジィ集合による定量化

最初に、熟練者の経験則の中で用いる言葉の意味を定量化しておく。駐車制御では距離と角度に関する評価の言葉の意味をメンバシップ関数で図4のように表現する。すなわち距離と角度に関して、(1)許容範囲にある(good) (2)正確である(very good)というファジィ集合を定義する。

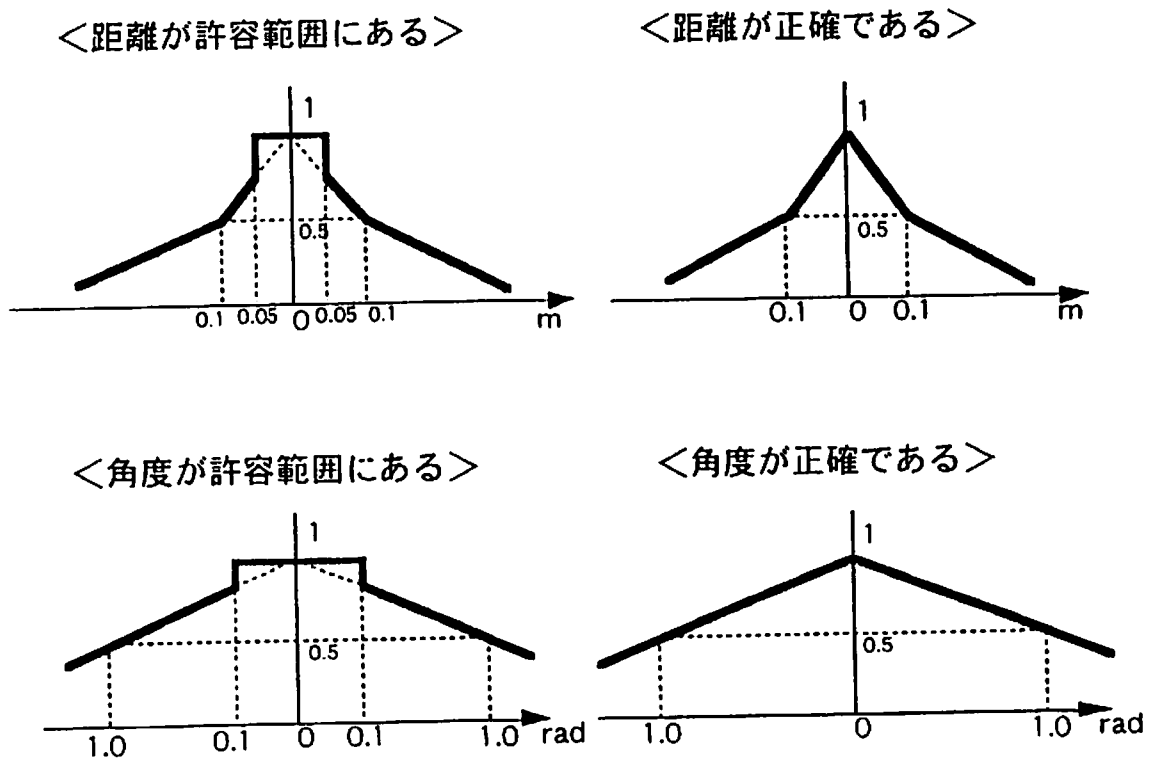


図4 ファジィ評価指標のメンバシップ関数

3.4 予見ファジィ制御

本論文では、判断部に状態評価ファジィ制御を用い、実行部に予見ファジィ制御[1][2]を用いた。予見ファジィ制御方式は熟練者の運転を (1)多数の制御目的の満足度をファジィ集合を用いて表現評価し、(2)システムの状態を見ながら「もし～の条件なら～する」といった制御知識を利用し、(3)制御対象の動特性

をシミュレーションする、という三つの戦略をアルゴリズム化する方式である。この方式は対象システムの状態の観測値をもとに、制御則で記述された制御指令の候補値に関してシミュレーションを行い、その結果より制御目的となる被評価量を予測（予見）し、その制御目的をファジィ推論によって評価し、一番最適な制御指令を決定するというものである。

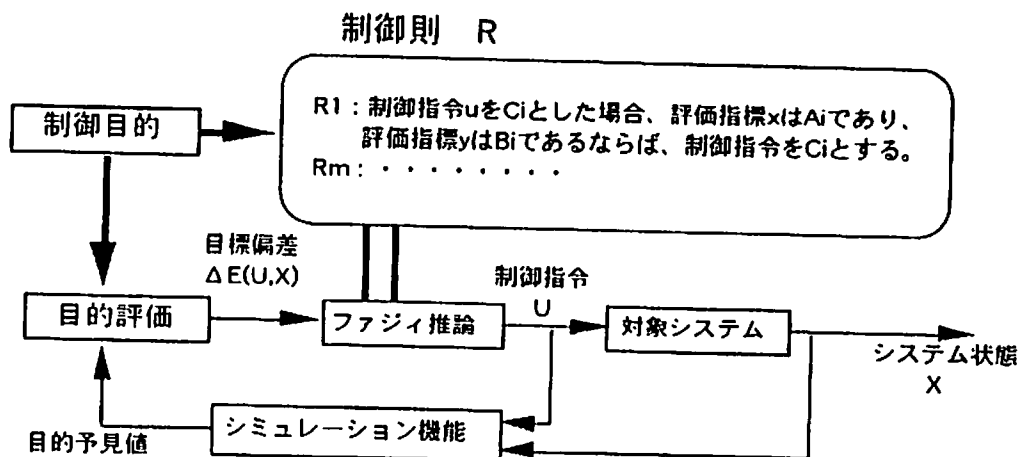


図5 予見ファジィ制御方式

本論文で用いる制御則は、「もし(If) 制御指令 $u$ を $C_i$ とした場合、評価指標 $x$ は $A_i$ であり、評価指標 $y$ は $B_i$ であるならば、(then) 制御指令 $u$ を $C_i$ とする。」といった制御則に基づき、最適な制御指令を決定していく。一般的な予見ファジィ制御の制御則を次に示す。

If( $u$  is  $C_i \rightarrow x$  is  $A_i$  and  $y$  is  $B_i$ ) then  $u$  is  $C_i$  ( $i=1, N$ )

前件部で現時点の $u$ を $C_i$ とした時に、評価する $x, y$ の値がどうなるかということ予測（予見）して、それが望ましければ実行するという制御則であるという点が、予見ファジィ制御の特徴である。これは2節で述べた熟練者の自動車操作のルール形式と全く同じ形式である。そこで、熟練者のルールに則したファジィルールを次のように記述する。

|                                         |                        |            |      |                    |
|-----------------------------------------|------------------------|------------|------|--------------------|
| IF ( $\phi = 0^\circ \rightarrow d =$   | Good, $d\theta =$      | Good)      | THEN | $\phi = 0^\circ$   |
| IF ( $\phi = 4^\circ \rightarrow d =$   | very Good, $d\theta =$ | very Good) | THEN | $\phi = 4^\circ$   |
| IF ( $\phi = -4^\circ \rightarrow d =$  | very Good, $d\theta =$ | very Good) | THEN | $\phi = -4^\circ$  |
| IF ( $\phi = 13^\circ \rightarrow d =$  | very Good, $d\theta =$ | very Good) | THEN | $\phi = 13^\circ$  |
| IF ( $\phi = -13^\circ \rightarrow d =$ | very Good, $d\theta =$ | very Good) | THEN | $\phi = -13^\circ$ |
| IF ( $\phi = 26^\circ \rightarrow d =$  | very Good, $d\theta =$ | very Good) | THEN | $\phi = 26^\circ$  |
| IF ( $\phi = -26^\circ \rightarrow d =$ | very Good, $d\theta =$ | very Good) | THEN | $\phi = -26^\circ$ |
| IF ( $\phi + 0 \rightarrow d =$         | Good, $d\theta =$      | Good)      | THEN | $\phi + 0^\circ$   |
| IF ( $\phi + 1^\circ \rightarrow d =$   | very Good, $d\theta =$ | very Good) | THEN | $\phi + 1^\circ$   |
| IF ( $\phi - 1^\circ \rightarrow d =$   | very Good, $d\theta =$ | very Good) | THEN | $\phi - 1^\circ$   |
| IF ( $\phi + 4^\circ \rightarrow d =$   | very Good, $d\theta =$ | very Good) | THEN | $\phi + 4^\circ$   |

IF ( $\phi - 4^\circ \rightarrow d = \text{very Good}, d\theta = \text{very Good}$ ) THEN  $\phi - 4^\circ$   
 IF ( $\phi + 9^\circ \rightarrow d = \text{very Good}, d\theta = \text{very Good}$ ) THEN  $\phi + 9^\circ$   
 IF ( $\phi - 9^\circ \rightarrow d = \text{very Good}, d\theta = \text{very Good}$ ) THEN  $\phi - 9^\circ$

以上の14個のルールで構成されている。ここで $\phi + 1^\circ$ は現在の舵角から $1^\circ$ 左にきることを意味している。dは目標位置と推定位置との距離、 $d\theta$ は目標位置と推定位置との $\theta$ の差であり、その評価は図4のGoodやvery Goodのファジィ集合で行われる。すなわち、「この時点で制御指令u(舵角)を $C_i$ とした場合、評価指標dは $A_i$ (良い、非常に良い)であり評価指標 $d\theta$ は $B_i$ (良い、非常に良い)であるならば、この制御則 $R_i$ を採用し、制御指令として $C_i$ を出力する」という形式である。つまり、現時点で実行可能な制御指令の適当な候補値に対してそれぞれ一定時間実行させた場合の予測値を(2)式で示したような対象モデルにより求め、最も評価値の高い制御指令を実行するというものである。

### 3.5 予見ファジィ制御の推論過程

予見ファジィ制御の推論過程を具体的に示す。制御指令uが取り得る値として $\{C_1, C_2, C_3\}$ の三つの候補値を考える。これらに関して制御対象のシステム状況に基づきシミュレーションを行い、ある制御目的d(例えば10秒後の位置)の予見値を求める。dについてGood(許容範囲にある)Very Good(正確である)と言ったファジィ集合を定義する。またもう一つの制御目的 $d\theta$ に関して同様にGood, Very Goodの評価を行う。

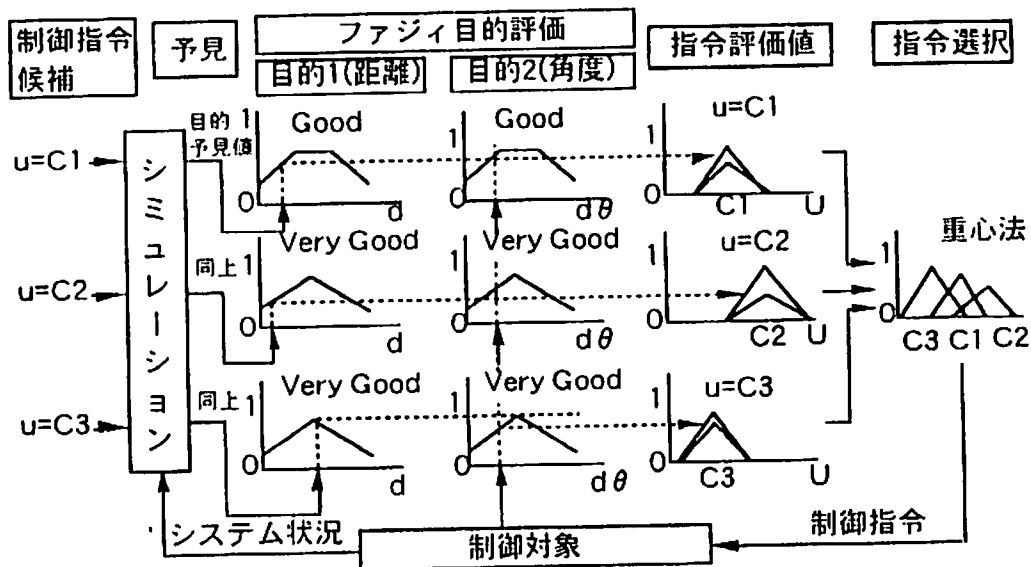


図6 予見ファジィ制御の推論過程

これらの評価について、IF部の制御目的の評価値同士を論理積演算し、その演算結果とTHEN部の制御指令のファジィ集合を論理演算して、各制御指令の評価値を求め、これらを論理和の演算により統合し、適切な制御指令の推



## 5. おわりに

自動車を駐車させるのに予見ファジィ制御を使用すれば、上手く自動操作できた。さらに人間が運転する時に考えている経験則をファジィ制御則とし、コンピュータに組み込むことによって、駐車制御のような複雑な制御でも実行できるということが確認できた。また、ここで用いた予見ファジィ制御則を対象システムの状況によって臨機応変に切り替えることができるので、その有効性が非常に高いと言える。

今回の実験では、タイヤの横滑りを考えない、非常に低速な旋回運動を想定してシミュレーションを行った。しかし、実際の自動車にこの制御システムを導入するときは、走行速度や路面の状況の変化、外乱などによってシミュレーションとは違った動きをすることが予想されるので、それらを十分に考慮する必要がある。また、安全性の観点からも人間が自動車を運転し駐車させるのは運転手が手と足を使って行うことになるであろう。したがって、人間とコンピュータが協調したシステムとし、舵角と速度に関するガイダンスをコンピュータが人間に知らせ、それを人間が実行できるようにすることが今後の課題である。なお、本研究は筑波大学学内プロジェクト研究からの助成に基づくものである。

## 参考文献

- [1] 安信、"ファジィ工学" 昭見堂(1991)
- [2] 日本ファジィ学会編、"講座ファジィ第五巻 ファジィ制御" 日刊工業新聞社(1993)
- [3] 宮田、三浦、河野、大北、"自立型移動ロボット「DREAM-1」の縦列駐車実験" 9th Fuzzy System Symposium(Sapporo, May 19,21,1993)
- [4] 前田、竹垣、"ファジィ推論を用いた移動ロボットの動的障害物回避制御" 日本ロボット学会誌 Vol.6 No.6 518/522 1988
- [5] 樋口 監修、"自動車工学" 自動車工学編集委員会編著 山海堂(1988)

|       |           |
|-------|-----------|
| 原稿受付日 | 平成5年8月23日 |
|-------|-----------|

論結果のファジィ集合を得る。この推論結果に、非ファジィ化演算（本実験では重心法）を施すことにより、制御指令を選択することができる。

### 3.6 シミュレーション条件

上記のように提案したファジィ制御方式をC言語により記述し、車両の動きを模擬する対象システムモデルと共に、パーソナルコンピュータ（PC98）に組み込み評価した。ここでは、縦列駐車と横移動の2つのパターンについてシミュレーションした結果を示す。車両は、以下に示す初期位置と初期角度から、目標位置と目標角度めがけて操作される。図7に各条件での位置関係を示す。

#### (1) 縦列駐車シミュレーション

左前方の目標位置にそのまま幅寄せする場合

初期位置： $(x_0, y_0) = (4.0\text{m}, -12.0\text{m})$       目標位置： $(x_e, y_e) = (0.0\text{m}, 0.0\text{m})$

初期角度： $\theta_0 = 90^\circ$       目標角度： $\theta_e = 90^\circ$

#### (2) 横移動シミュレーション

左横の目標位置に移動する場合

初期位置： $(x_0, y_0) = (4.0\text{m}, 0.0\text{m})$       目標位置： $(x_e, y_e) = (0.0\text{m}, 0.0\text{m})$

初期角度： $\theta_0 = 90^\circ$       目標角度： $\theta_e = 90^\circ$

ただし、自動車の走行速度  $v$  は、 $0\text{ m/s}$ （止まる）、 $0.2\text{ m/s}$ （進む）、 $-0.2\text{ m/s}$ （戻る）の3値、ホイールベース  $L = 2.6\text{ m}$ 、トレッド幅  $B = 1.5\text{ m}$ 、最小回転半径  $R_2 = 5.3\text{ m}$ 、最大舵角  $\phi_{\max} = 35^\circ$  とした。

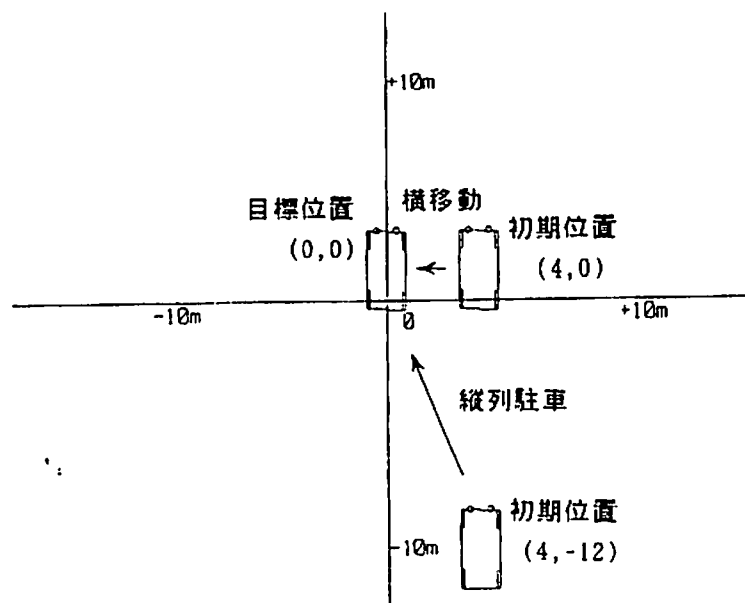


図7 シミュレーションの目標位置及び初期位置

#### 4. シミュレーション結果と検討

##### 4.1 縦列駐車

3.6(1)で示した縦列駐車  
のシミュレーション結果を  
図8に示す。停止位置は、

$$(x, y) = (0.02, 0.00)$$

$$\theta = 94.90^\circ$$

であった。

ここでは、縦列駐車  
において切り返しをする  
という人間の駐車戦略  
に基づく途中の目標を

$$(2.0, -8.0), \theta = 125^\circ$$

に置くことで取り入  
れている。この途中目  
標を経て、上手くハン  
ドルを操作し、最終目  
標にたどり着いている  
のがわかる。

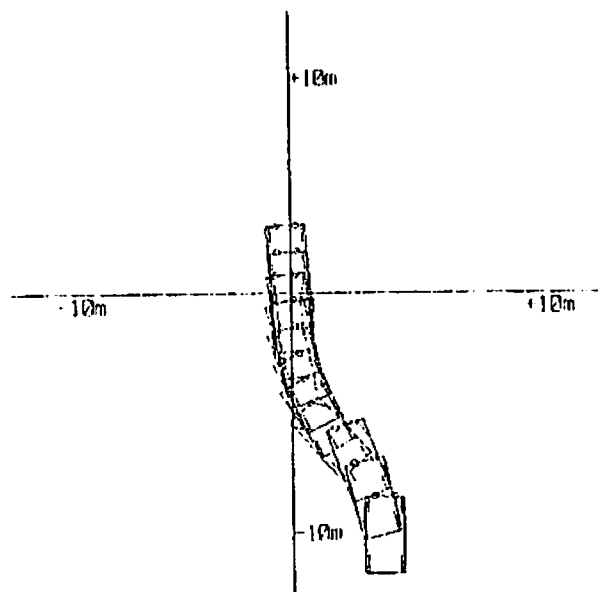


図8 縦列駐車  
のシミュレーション

##### 4.2 横移動

3.6(2)で示した横移動  
のシミュレーション結果  
を図9に示す。停止位置は

$$(x, y) = (-0.08, 0.22)$$

$$\theta = 84.85^\circ$$

であった。

横移動の場合  
は最終目標にバックで  
駐車させやすい位置に  
持つて行くために、前  
方に途中目標を置き一  
度前進させた。そして  
、この途中目標に達し  
た後、最終目標を目標  
とし、バックさせた。こ  
のように、バックの切  
り返しを用いて、横移  
動の場合もうまく操  
作できている。

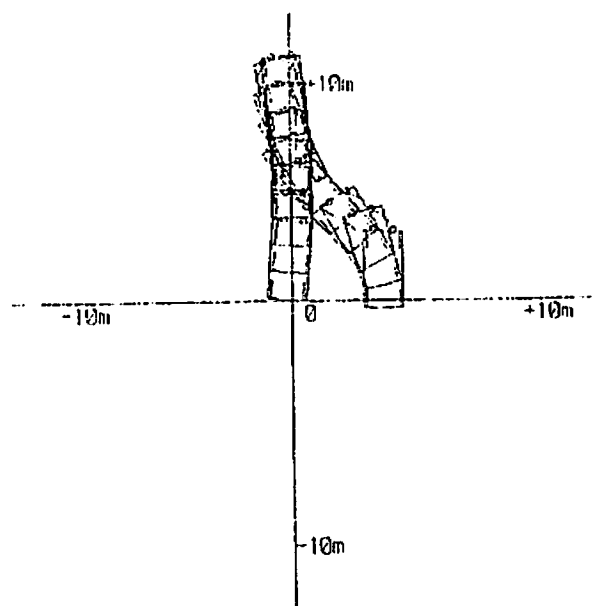


図9 横移動  
のシミュレーション

これらのシミュレーション結果が示すように、途中目標やルールを巧みに切り替え、この目標にうまく到達出来るようハンドル操舵角を予見ファジィ制御により推論することによって、様々な状況に対して駐車制御が実行可能であると期待できる。